

ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA MEDIANTE CONTROLADORES FUZZY LOGIC PARA SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE UNA MICRORRED ELECTRO-TÉRMICA CON CONEXIÓN A RED

Diego Arcos-Avilés^(a), Francesc Guinjoan^(b), Luis Marroyo^(c)

^(a)Departamento de Eléctrica y Electrónica
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Quito-Ecuador
dgarcos@espe.edu.ec

^(b)Departamento de Ingeniería Electrónica
Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona-España
Francesc.guinjoan@upc.edu

^(c)Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad Pública de Navarra, Pamplona-España
luisma@unavarra.es

RESUMEN

Se presenta el diseño de una estrategia de gestión energética mediante dos controladores Fuzzy Logic que se encargan de regular el flujo de potencia hacia los sistemas de almacenamiento en una microrred electro-térmica. Las políticas del controlador Fuzzy administran la potencia entregada o absorbida por los elementos de almacenamiento con el objetivo fundamental de minimizar un conjunto de criterios de calidad establecidos así como el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica principal.

Se estudiarán los beneficios de incluir elementos de almacenamiento térmico en una microrred eléctrica. Mediante simulación numérica y por medio de los criterios de calidad establecidos se validará la estrategia de gestión energética para una microrred electro-térmica y se comparará su desempeño frente a una estrategia de gestión energética para una microrred únicamente eléctrica.

Palabras clave: Controlador Fuzzy Logic, Microrred electro-térmica, Estrategia de gestión energética, Perfil de potencia

ABSTRACT

A fuzzy logic controller strategy for battery energy management in a grid connected electro-thermal microgrid is presented. The fuzzy control policy manages the power of the microgrid storage elements in order to minimize a set of quality indices involving, among others, the power profile exchanged with the mains.

The benefits of the inclusion of thermal elements in an electric microgrid scenario are studied. By numerical simulation and using a set of evaluation criteria the energy management strategy for electro-thermal microgrid is validated and compared with the energy management of an electric microgrid.

Keywords: Fuzzy logic controller, Electro-thermal microgrid, Energy management strategy, Power profile

1. INTRODUCCIÓN

Los beneficios de las fuentes de energía renovables en el contexto de la estructura energética son infinitos, debido a que provienen de fuentes inagotables y son libres de contaminación. La escalabilidad de potencia de varios recursos renovables recae en el concepto de generación distribuida en donde las fuentes de generación pueden ser ubicadas cerca del lugar donde se realice el consumo de energía con lo cual se minimiza los costos y pérdidas de transporte [1], [2].

Dada la alta variabilidad de ambos recursos renovables y del consumo de carga, es necesaria la inclusión de diferentes sistemas de almacenamiento (i.e. baterías, hidrógeno, etc.) con el objetivo de mantener un balance de energía a largo plazo en una microrred [3], [4], [5], [6]. En el contexto de la generación distribuida de recursos renovables, las estrategias de gestión energética para regular el flujo de energía de los sistemas de almacenamiento depende de su aplicación. Es así que algunos estudios se encaminan en reducir el tamaño del sistema de almacenamiento [7], [8], [9]; mientras otros se enfocan en maximizar la producción energética de la microrred [10] o en buscar una mayor rentabilidad económica [11], [12]. Adicionalmente, para reducir el impacto de la integración de recursos renovables con la red eléctrica principal, se han realizado diversos trabajos que se han sido orientados a mejorar el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica [13], [14], [15].

Debido a la alta variabilidad del consumo y generación en una microrred, una aproximación analítica para el diseño de una estrategia de gestión energética podría resultar difícil de realizar. En contraste, el diseño de una estrategia de gestión energética basada en reglas cualitativas es sencillo y se lo puede realizar mediante un Controlador Fuzzy Logic (FLC Fuzzy Logic Controller) [16].

El propósito de este trabajo es extender el diseño del FLC presentado en [16] para una microrred únicamente eléctrica, que incluya un sistema de almacenamiento térmico como los analizados en [17] y [18]. El estudio se centrará en el diseño de un FLC para una microrred electro-térmica doméstica con el objetivo de minimizar el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica principal y analizar los beneficios que se presentan la introducción de elementos térmicos en el escenario de una microrred residencial.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA Y DATOS DE ENTRADA

La microrred bajo estudio consiste en una microrred electro-térmica doméstica compuesta por una microrred eléctrica y una microrred térmica [15], [16] que se muestran en la figura 1 y figura 2 respectivamente.

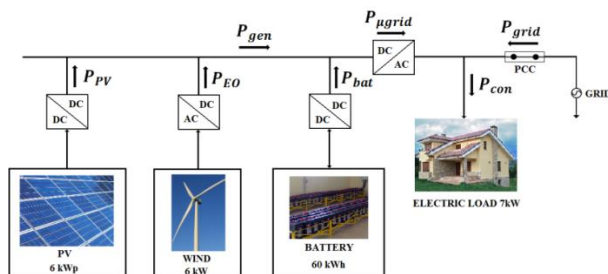


Figura 1 Esquema de microrred eléctrica

Donde P_{PV} es la potencia fotovoltaica generada; P_{EO} es la potencia eólica generada; P_{gen} es la potencia renovable generada, P_{bat} es la potencia inyectada/absorbida por el sistema de almacenamiento eléctrico; P_{con} es la potencia eléctrica consumida por la vivienda; $P_{\mu grid}$ es la potencia disponible en la microrred eléctrica; y P_{grid} es la potencia inyectada/absorbida por la red eléctrica.

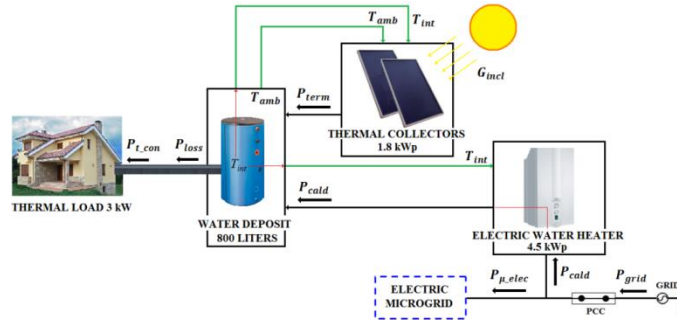


Figura 2 Esquema de microrred térmica

Donde G_{incl} es la irradiancia incidente en el plano inclinado; T_{int} es la temperatura interna del depósito de agua; T_{amb} es la temperatura ambiente; P_{term} es la potencia generada por los colectores térmicos, P_{cald} es la potencia consumida por el sistema eléctrico para calentamiento de agua, P_{loss} son las pérdidas por conducción en el depósito de agua y $P_{t,con}$ es la potencia térmica consumida por la vivienda.

La figura 3 muestra el esquema de la microrred bajo estudio la cual incluye un generador fotovoltaico de 6 kW_p, un generador eólico de 6 kW, un sistema de almacenamiento eléctrico formado por un banco de baterías con una capacidad de 60 kWh, un arreglo de colectores térmicos de 1.8 kW_p, un sistema eléctrico para calentamiento de agua de 4.5 kW_p, un sistema de almacenamiento térmico compuesto por un depósito de agua con una capacidad de 800 litros, una carga local eléctrica de 7kW y una carga local térmica de 3 kW.

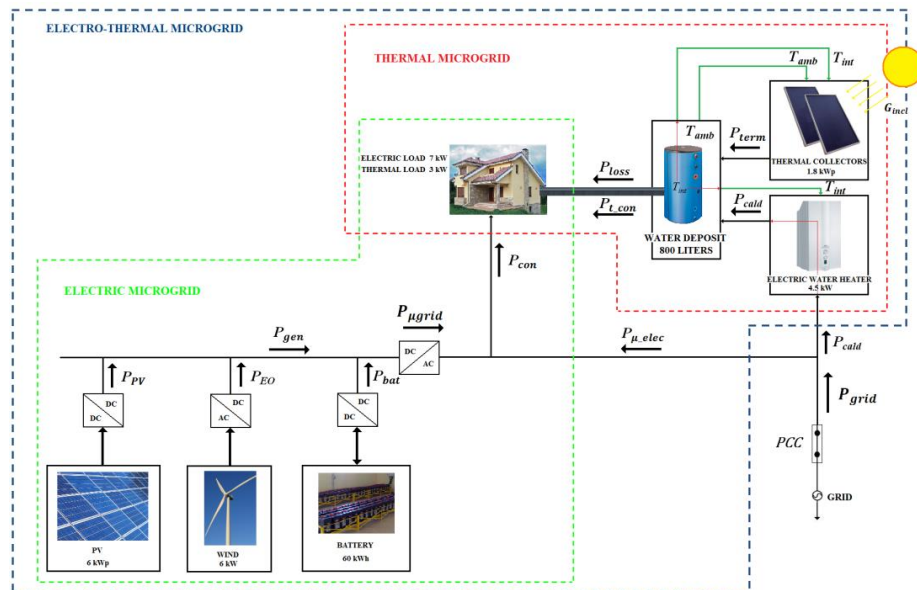


Figura 3 Esquema de microrred electro-térmica conectada a la red eléctrica

De la figura 3 se pueden deducir las siguientes expresiones:

$$P_{gen} = P_{PV} + P_{EO} \quad (1)$$

$$P_{con} = P_{\mu grid} + P_{\mu elec} \quad (2)$$

$$P_{\mu grid} = P_{gen} + P_{bat} \quad (3)$$

$$P_{grid} = P_{cald} + P_{\mu elec} \quad (4)$$

La potencia intercambiada con la red eléctrica se obtiene mediante:

$$P_{\mu elec} = P_{con} - P_{gen} - P_{bat} \quad (5)$$

$$P_{grid} = P_{con} - P_{gen} - P_{bat} + P_{cald} \quad (6)$$

La diferencia entre la potencia eléctrica consumida por la carga local y la potencia eléctrica generada por las fuentes renovables se puede definir como el balance de potencia de la microrred eléctrica P_{pwb} , por lo que (5) y (6) se reescriben como:

$$P_{pwb} = P_{con} - P_{gen} \quad (7)$$

$$P_{\mu elec} = P_{pwb} - P_{bat} \quad (8)$$

$$P_{grid} = P_{pwb} + P_{cald} - P_{bat} \quad (9)$$

Donde $P_{\mu elec}$ el perfil de potencia entregado por la microrred eléctrica. Las expresiones anteriores se obtuvieron al considerar los siguientes aspectos:

- La potencia producida por las dos fuentes de generación renovable P_{PV} y P_{EO} así como la potencia consumida por la carga local y por el sistema eléctrico para calentamiento de agua son siempre positivas.
- La potencia de la batería P_{bat} , es positiva cuando la batería inyecta potencia a la microrred (proceso de descarga) y es negativa cuando la batería absorbe potencia de la microrred (proceso de carga).
- El perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica P_{grid} , es positivo cuando la red eléctrica principal inyecta potencia a la microrred electro-térmica y es negativo cuando absorbe potencia de la microrred electro-térmica.

Por otro lado, las figuras 4a y 4b muestran los perfiles reales de potencia generada por las fuentes renovables y consumida por la carga local respectivamente. De igual manera, las figuras 5a y 5b muestran el perfil de irradiancia solar y el consumo térmico realizado por la vivienda. Éstas medidas fueron obtenidas cerca de la ciudad de Pamplona (42.29N 1.38O) con un período de muestreo de 15 minutos en un año calendario comprendido entre febrero 2009 a febrero 2010.

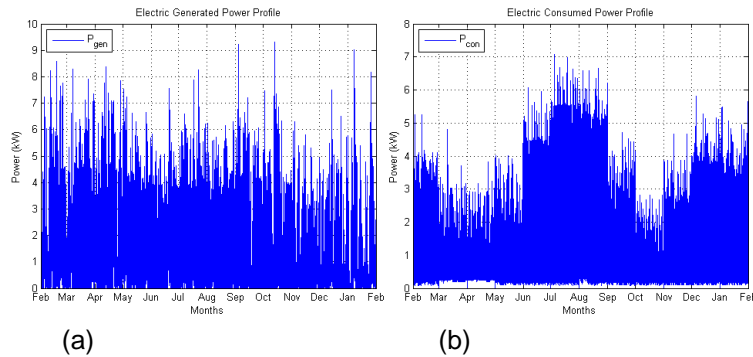


Figura 4 Perfil de potencia eléctrica. (a) Generada P_{gen} . (b) Consumida P_{con}

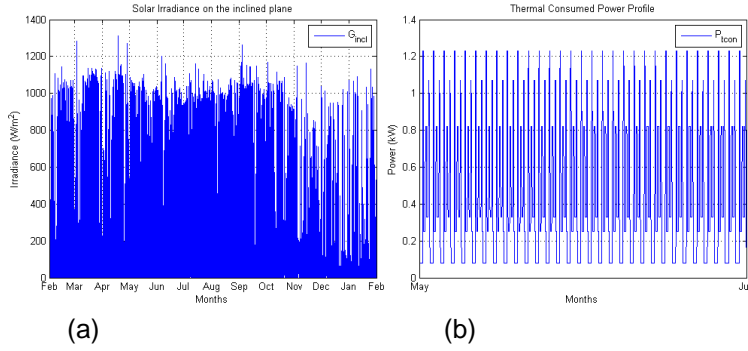


Figura 5 (a) Irradiancia solar G_{incl} . (b) Perfil de potencia térmica consumida P_{tcon}

3. DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS DE CALIDAD

Para poder evaluar la calidad del perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica, se utilizarán los criterios de calidad establecidos en [15], [16], los cuales son presentados a continuación para su mayor comprensión.

- **CALIDAD DE POTENCIA (PQ Power Quality)**, este criterio muestra la suavidad que presenta el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica, y se lo ha definido como:

$$PQ = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} P_{grid_n}^2}}{P_{DC}} \quad (10)$$

Donde P_{grid_n} es la componente n de la descomposición por FFT (Fast Fourier Transform) y P_{DC} es el valor medio del perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica. Si el valor de este criterio de calidad es cercano a cero (0) significa que el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica contiene un bajo contenido armónico y por lo tanto es de mejor calidad.

- **RANGO DE VARIACIÓN DE POTENCIA (PVR Power Variation Range)**, cuantifica que tan óptima es la estrategia de gestión energética utilizada y se define como:

$$PVR = \frac{\Delta P_{grid}}{\Delta P_{pwb}} = \frac{P_{grid\ max} - P_{grid\ min}}{P_{pwb\ max} - P_{pwb\ min}} \quad (11)$$

Donde ΔP_{grid} es la variación del perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica luego de aplicarse una determinada estrategia de gestión energética; ΔP_{pwb} es la variación del perfil de potencia para una microrred sin ninguna estrategia de gestión ni sistema de almacenamiento; $P_{grid\ max}$ y $P_{grid\ min}$ son los valores máximos de potencia inyectada y absorbida por la red eléctrica respectivamente; y $P_{pwb\ max}$ y $P_{pwb\ min}$ son los valores máximo y mínimo del perfil de potencia intercambiado con la red para una microrred sin estrategia de gestión ni elementos de almacenamiento eléctrico y térmico.

- **RANGO DINÁMICO DE LA BATERÍA (BDR Battery Dynamic Range)**, está definido como la diferencia entre la máxima y mínima cantidad de energía almacenada en la batería:

$$BDR = E_{bat\ max} - E_{bat\ min} \quad (12)$$

En este contexto, un mejor comportamiento de una estrategia de gestión energética, se obtiene mediante la minimización del valor de la calidad de potencia (PQ), rango de variación de potencia (PVR) y rango

dinámico de la batería (BDR). Éstos índices de calidad tienen relación con las variables de potencia y energía involucradas en el sistema cuyas expresiones están dadas por (13), (14) y (15).

$$\Delta E_i(t) = \int_t^{t+\Delta T} P_i(\tau) d\tau \quad (13)$$

$$\Delta E_i(nT_s) = \int_{(n-1)T_s}^{nT_s} P_i(\tau) d\tau \cong P_i[(n-1)T_s]T_s \quad (14)$$

$$E_{i,a} = \sum_{n=1}^N \Delta E_i(nT_s) \quad (15)$$

Donde $\Delta E_i(t)$ es la evolución de la energía para una variable de potencia $P_i(t)$ a lo largo de un período ΔT , al considerar iguales períodos de muestreo e integración ($\Delta T = T_s = 15 \text{ min}$); $E_{i,a}$ es la energía anual; y N es el número de muestras en un año calendario ($N = 365 \cdot 24 \cdot 4 = 35040$ muestras).

4. ESTRATEGIA DE GESTIÓN ENERGÉTICA

Tal como se puede deducir de la expresión (9), para tener un control sobre el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica, es necesario controlar la potencia inyectada o absorbida por el banco de baterías y la potencia consumida por el sistema eléctrico para calentamiento de agua.

En este contexto, esta estrategia de gestión energética será desarrollada mediante la consideración de las siguientes políticas de control:

- Se debe garantizar el balance de potencia de la microrred eléctrica, lo que significa que el sistema de almacenamiento de energía eléctrica deberá inyectar/absorber potencia cuando el consumo de la carga sea mayor/menor que la potencia producida por los recursos renovables.
- Se debe garantizar el balance de potencia de la microrred electro-térmica, es decir, el sistema eléctrico para calentamiento de agua deberá absorber potencia de la microrred eléctrica o de la red eléctrica principal con el objetivo de mantener la temperatura del agua dentro del depósito en un rango establecido.
- El perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica debe ser controlado, lo que significa que los dos sistemas de almacenamiento de energía (eléctrico y térmico) y el sistema eléctrico para calentamiento de agua deberán suavizar a medida de lo posible el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica, minimizando los picos de potencia de consumo y generación.
- Se debe preservar la vida útil del sistema de almacenamiento eléctrico, evitando ciclos profundos de carga y descarga de las baterías.

5. DISEÑO DE LOS CONTROLADORES FUZZY LOGIC

5.1. CONTROL DE LA MICRORRED ELÉCTRICA

El control de la microrred se realizó mediante un FLC tipo Mamdani y defuzzificación por centro de gravedad [19], [20]. La figura 6a muestra el diagrama de bloques para el sistema de control de esta microrred el cual incluye un FLC de dos entradas $P_{pwb}(n)$, $e(n)$ y una salida $P_{bat}(n)$; y un estimador del estado de carga actual de la batería cuyo diagrama de bloques se muestra en la figura 6b [16].

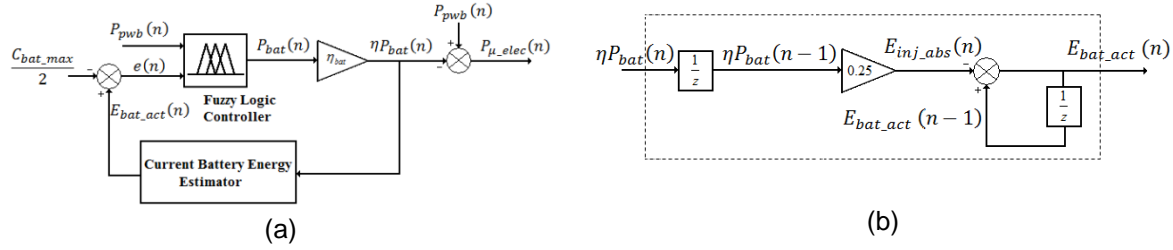


Figura 6 Diagrama de bloques. (a) Estrategia de gestión mediante FLC de la microrred eléctrica. (b) Estimador de la carga actual de la batería

Donde η_{bat} representa el factor de rendimiento de la batería; C_{bat_max} es la capacidad máxima de almacenamiento de la batería; $E_{bat_act}(n)$ es el valor de la energía actual de la batería; y $e(n)$ representa el estado de carga o descarga de la batería respecto a su capacidad media y viene dada por:

$$e(n) = C_{bat_max}/2 - E_{bat_act}(n) \quad (16)$$

El FLC ha sido diseñado con la ayuda del Fuzzy Toolbox de Matlab®. El punto clave del diseño es el ajuste de parámetros del FLC mediante simulación numérica (i.e. número, tipo y ubicación de funciones de pertenencia de las variables de entrada, salida y base de reglas) con el objetivo de minimizar los criterios de calidad establecidos.

La figura 7 muestra las Funciones de Pertenencia (MF Membership Functions) para cada entrada, donde se ha considerado una definición estándar de cinco (5) MF triangulares uniformemente distribuidas a lo largo del rango de variación de cada una de las variables (17), las cuales se han denotado como NB, NS, Z, PS y PB, donde “N” representa Negativo, “P” representa Positivo, “B” representa Grande, “S” representa Pequeño y “Z” representa Cero. Por otro lado, la figura 8 muestra las MF asignadas a la salida $P_{bat}(n)$, con siete (7) MF trapezoidales denotadas como NB, NM, NS, Z, PS, PM y PB, donde “M” representa Medio. Finalmente, en la tabla 1 se presentan la base de reglas obtenidas para el FLC de la microrred eléctrica.

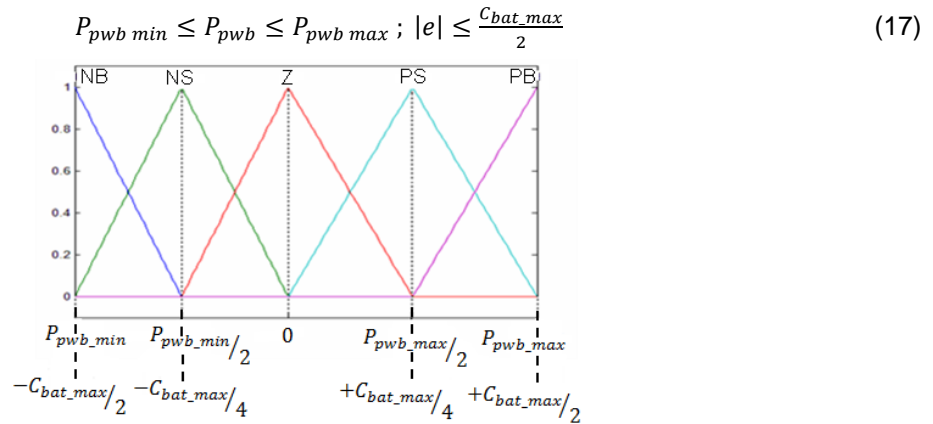


Figura 7 Funciones de pertenencia para las variables de entrada $P_{pwb}(n)$ y $e(n)$

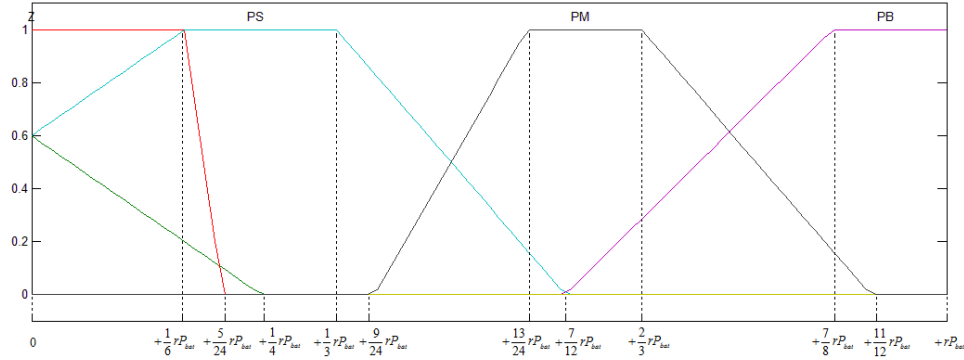


Figura 8 Funciones de pertenencia de la variable de salida $P_{bat}(n)$. Semiplano positivo.

Tabla 1 Base de reglas para el controlador Fuzzy Logic de la microrred eléctrica

$e \backslash P_{pwb}$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NM	NB	NB
NS	NB	NB	NS	PM	PM
Z	NM	NM	Z	PM	PM
PS	NM	NM	PS	PM	PM
PB	PB	PB	PM	PB	PB

5.2. CONTROL DE LA MICRORRED ELECTRO-TÉRMICA

El propósito de la microrred térmica es cubrir las necesidades de consumo de potencia térmica de la vivienda $P_{t,con}$, objetivo que lo alcanza al mantener la temperatura del depósito de agua en un rango establecido mientras exista un excedente de generación en la microrred eléctrica. En este contexto, el perfil de potencia consumida por el sistema eléctrico para calentamiento de agua P_{cald} depende de la temperatura interna en el depósito de agua T_{int} y del perfil de potencia entregado por la microrred eléctrica $P_{\mu,elec}$. La figura 9 muestra el diagrama de bloques del sistema de control propuesto para la microrred electro-térmica, el cual incluye: un FLC tipo Mamdani y defuzzificación por centro de gravedad [19], [20] de dos entradas $P_{\mu,elec}(n-1)$, $T_{int}(n-1)$ y una salida $P_{cald}(n)$; un estimador de la temperatura actual dentro del depósito de agua (donde η_{cal} es la eficiencia del sistema eléctrico para calentamiento de agua); y un filtro pasa bajos (LPF Low Pass Filter) sugerido en [13], [14], [15] que se encarga de suavizar el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica.

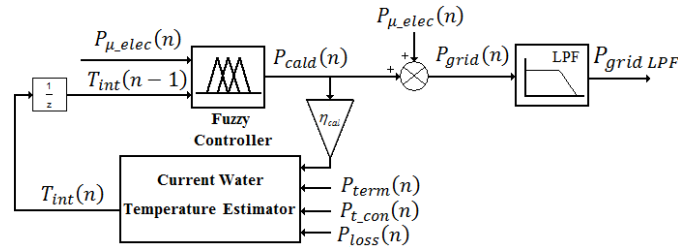


Figura 9 Diagrama de bloques sistema de control propuesto para una microrred electro-térmica

Como se muestra en la figura 9, la temperatura actual en el interior del depósito de agua $T_{int}(n)$, requiere el conocimiento de la variación de temperatura debido a la potencia generada por los colectores térmicos $P_{term}(n)$, la potencia consumida por el sistema eléctrico para calentamiento de agua $P_{cald}(n)$, la potencia térmica consumida por la vivienda $P_{t,con}(n)$ y la potencia de pérdidas por conducción del

depósito de agua $P_{loss}(n)$. Mediante la aplicación de la primera ley de la Termodinámica [21], el balance térmico de la microrred puede ser definido como:

$$E_{in}(n) = E_{out}(n) + E_{st}(n) \quad (18)$$

Donde $E_{in}(n)$ y $E_{out}(n)$ es la energía entrante y saliente de la microrred electro-térmica respectivamente; y $E_{st}(n)$ es la energía térmica almacenada en el depósito de agua. Al mismo tiempo, la energía entrante y saliente de la microrred electro-térmica se definen como:

$$E_{in}(n) = E_{cald}(n) + E_{term}(n) \quad (19)$$

$$E_{out}(n) = E_{t_{con}}(n) + E_{t_{loss}}(n) \quad (20)$$

Donde, $E_{cald}(n)$ es la energía suministrada por el sistema eléctrico para calentamiento de agua; $E_{term}(n)$ es la energía proporcionada por los colectores térmicos; $E_{t_{con}}(n)$ es la energía térmica consumida por la vivienda; y $E_{t_{loss}}(n)$ energía de pérdidas por conducción en el depósito de agua. Estas energías pueden calcularse mediante (14) y su respectiva potencia asociada. La potencia producida por los colectores térmicos $P_{term}(n)$ se define como [22], [23]:

$$mod = \frac{P_{CO\ max}}{P_{CO\ inst}} \quad (21)$$

$$P_{term}(n) = \begin{cases} 0 & T_{int}(n) > T_{max} + 5 \\ P_{mod}(n) \cdot mod & T_{int}(n) < T_{max} + 5 \end{cases} \quad (22)$$

$$P_{mod}(n) = \left\{ -2 \times 10^{-9} [T_{int}(n) - T_{amb}(n)]^6 + 6 \times 10^{-7} [T_{int}(n) - T_{amb}(n)]^5 - 7 \times 10^{-5} [T_{int}(n) - T_{amb}(n)]^4 + \dots \right. \\ \left. \dots + 3 \times 10^{-3} [T_{int}(n) - T_{amb}(n)]^3 - 7 \times 10^{-2} [T_{int}(n) - T_{amb}(n)]^2 - 8.6968 [T_{int}(n) - T_{amb}(n)] + \dots \right. \\ \left. \dots + 1735.5 \right\} \cdot \frac{G_{incl}(n)}{G_{ref}} \quad (23)$$

Donde mod es el número de colectores térmicos instalados; $P_{CO\ max}$ es la potencia térmica máxima que entregan los colectores térmicos; $P_{CO\ inst}$ es la potencia térmica instalada; T_{max} es la temperatura máxima del agua dentro del depósito; G_{ref} es la irradiancia de referencia; L es la longitud del depósito de agua. Además, las pérdidas por conducción $P_{loss}(n)$ se pueden expresar como [24]:

$$P_{loss}(n) = \frac{2\pi \cdot L \cdot k}{\ln(R_2/R_1)} [T_{int}(n) - T_{amb}(n)] \quad (24)$$

Donde k es la conductividad térmica de las paredes del depósito de agua; R_1 es el radio interno del depósito; y R_2 es el radio externo del depósito. Por otro lado, de acuerdo con [17] y [18], el valor máximo de energía térmica almacenada en el depósito de agua se puede expresar como:

$$E_{st}(n) = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot \Delta T_{int}(n) \quad (25)$$

$$\Delta T_{int}(n) = T_{int}(n) - T_{int}(n-1) \quad (26)$$

Donde ρ es la densidad del agua (kg/m^3); C_p es el calor específico del agua ($\text{kWh/kg}^\circ\text{C}$); y V es el volumen del depósito de agua.

A partir de las expresiones (18), (19), (20), (25) y (26) se obtiene la temperatura actual del depósito de agua:

$$T_{int}(n) = \frac{E_{cald}(n) + E_{term}(n) - E_{t_{con}}(n) - E_{t_{loss}}(n)}{\rho \cdot C_p \cdot V} + T_{int}(n-1) \quad (27)$$

De la misma manera que para la microrred eléctrica, los parámetros del FLC fueron seleccionados con el objetivo de minimizar los criterios de calidad definidos en la sección 3. Este proceso de ajuste se encuentra descrito en [16] y se lo puede resumir en los siguientes pasos:

- Seleccionar las variables de entrada y salida del FLC.
- Realizar el diseño inicial del controlador mediante la definición del rango de las variables del controlador, número, tipo y ubicación de las funciones de pertenencia y elaboración de la base de reglas inicial.
- Optimización del FLC con el objetivo de minimizar los criterios de calidad establecidos, mediante el ajuste de la ubicación de las funciones de pertenencia y base de reglas.

Luego de realizar este procedimiento de ajuste, en la tabla 2 se muestra la base de reglas definitiva para el FLC de la microrred electro-térmica, donde se ha considerado cinco (5) MF para cada una de las entradas denotadas como NB, NS, Z, PS y PB, cuyas gráficas se aprecian en la figura 10a y figura 10b para la entrada $P_{\mu_{elec}}(n-1)$ y $T_{int}(n-1)$ respectivamente; y seis (6) MF para la salida P_{cald} denotadas como NBB, NB, NS, Z, PS y PB donde “BB” representa Muy Grande, cuya gráfica se puede observar en la figura 11. Los rangos de variación de las variables de entrada y salida se definen en (28).

$$-6kW < P_{\mu_{elec}} < 6kW \quad 20^\circ < T_{int} < 80^\circ C \quad 0 < P_{cald} < 4.5kW \quad (28)$$

Tabla 2 Base de reglas para el FLC de la microrred electro-térmica

$P_{\mu_{elec}} \backslash T_{int}$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PS	Z	NB	NB
NS	PS	Z	NS	NB	NBB
Z	Z	NS	NB	NBB	NBB
PS	NS	NB	NBB	NBB	NBB
PB	NB	NBB	NBB	NBB	NBB

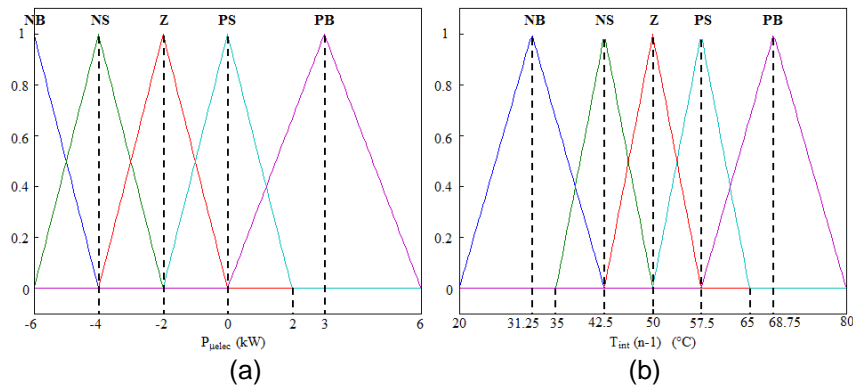


Figura 10 Funciones de pertenencia variables de entrada (a) $P_{\mu_{elec}} (n)$. (b) $T_{int}(n-1)$

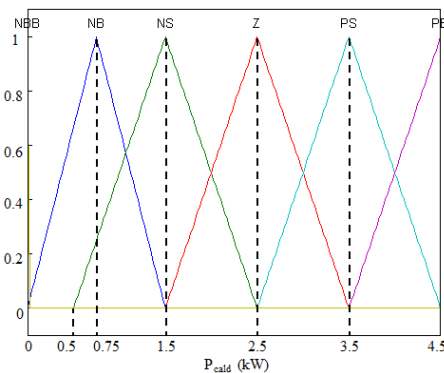


Figura 11 Funciones de pertenencia para la variable de salida $P_{cald} (n)$

6. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Mediante simulación numérica, los atributos de la estrategia de gestión energética propuesta para una microrred electro-térmica son comparados con los que presenta la microrred únicamente eléctrica estudiada en [16]. Las simulaciones se realizaron con los parámetros que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3 Parámetros de simulación

Símbolo	Parámetros		
	Descripción	Valor	Unidad
PV	Potencia fotovoltaica instalada	6	kW
EO	Potencia eólica instalada	6	kW
P_{con}	Potencia eléctrica consumida	7	kW
$C_{bat\ max}$	Capacidad máxima de la batería	60	kWh
η_{bat}	Eficiencia de la batería	83.4	%
$P_{CO\ max}$	Potencia máxima de los colectores térmicos	2	kW
$P_{CO\ inst}$	Potencia térmica instalada	1.8	kW
$P_{cald\ max}$	Potencia del sistema eléctrico para calentamiento de agua	4.5	kW
η_{cal}	Eficiencia del sistema eléctrico para calentamiento de agua	95	%
G_{ref}	Irradiancia de referencia	1000	W/m ²
$P_{t\ con}$	Potencia térmica consumida	3	kW
T_{amb}	Temperatura ambiente	30	°C
V	Volumen del depósito de agua	0.8	m ³
L	Longitud del depósito de agua	2.138	m
R_1	Radio interno del depósito de agua	0.375	m
R_2	Radio externo del depósito de agua	0.475	m
k	Conductividad térmica en las paredes del depósito de agua	24×10 ⁻⁶	kW/ m·°C
Tf	Tamaño del filtro pasa bajos de ventana móvil	3	horas

Las figura 12a y figura 12b muestran el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica para una microrred únicamente eléctrica y una microrred electro-térmica respectivamente, donde se puede apreciar la disminución de los picos de inyección de potencia por parte de la red eléctrica principal (perfil negativo). La tabla 4 se presenta una comparación entre las dos microrredes, en función de los valores obtenidos para los criterios de calidad establecidos.

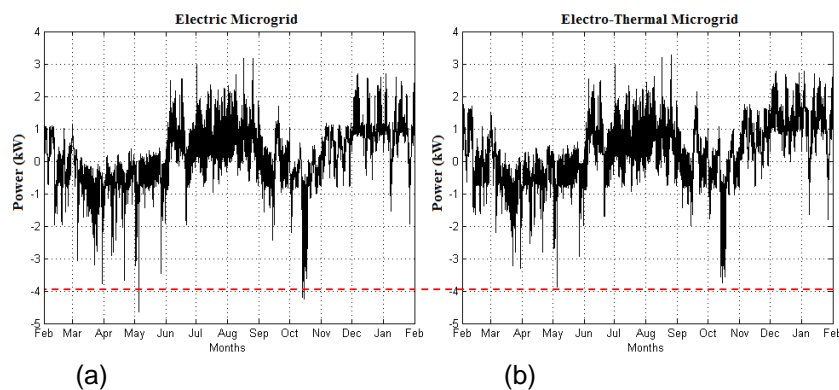


Figura 12 Perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica. (a) Microrred eléctrica. (b) Microrred electro-térmica

Tabla 4 Parámetros de simulación

Tipo de Microrred	Criterios de Calidad		
	PQ	PVR (%)	BDR (%)
Eléctrica	6.83	61.30	42.65
Electro-térmica	3.86	44.24	40.96

Estos resultados destacan los altos beneficios al incluir un sistema térmico en la microrred eléctrica, lo cual se verifica mediante la reducción de los criterios de evaluación PQ, PVR y BRD con un 43,48%, 27,83% y 3,96% respecto a una microrred únicamente eléctrica. Las figuras 13a, 13b, 14a y 14b presentan el comportamiento del FLC aplicado a una microrred electro-térmica para un día y una semana específicos del año en estudio, donde se puede observar la mejora existente en el perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica.

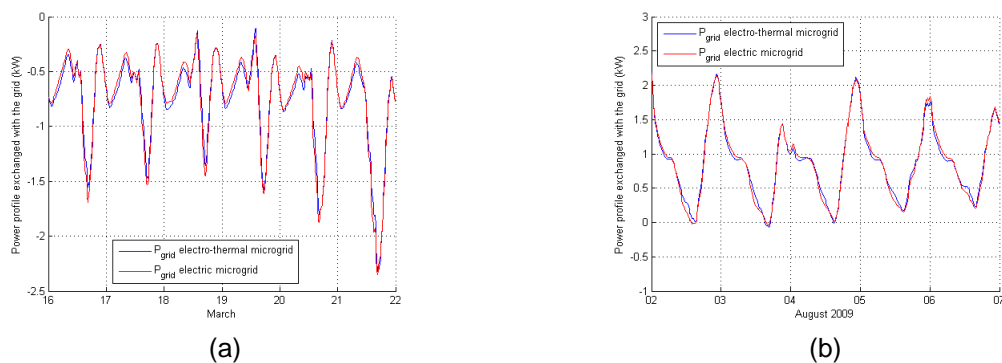


Figura 13 Potencia intercambiada con la red eléctrica. (a) 16 al 22 de marzo. (b) 02 al 07 de octubre.

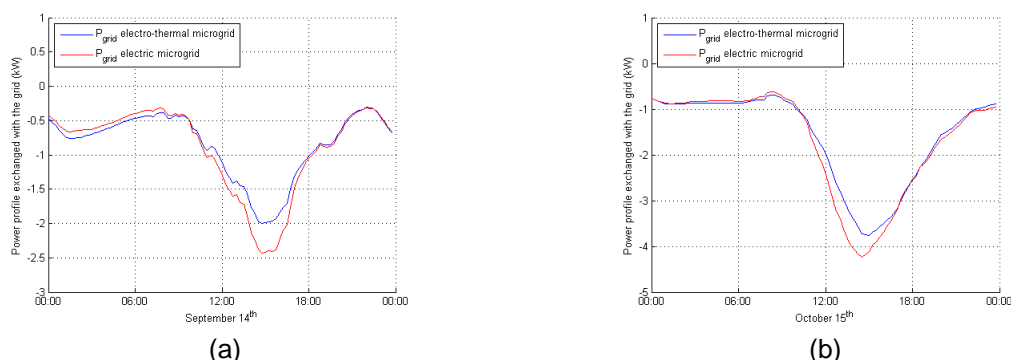


Figura 14 Potencia intercambiada con la red eléctrica. (a) 14 septiembre. (b) 15 de octubre.

La evolución de la energía almacenada en la batería para las dos microrredes, se presenta en la figura 15a y 15b, donde se aprecia una ligera disminución en el valor máximo del estado de carga de la batería para una microrred electro-térmica, lo cual confirma la reducción del criterio de calidad BDR. Finalmente, en la figura 16 se muestra la evolución de la temperatura en el interior del depósito de agua durante el año en estudio, donde su valor máximo y mínimo fue 42.77°C y 70.32°C respectivamente.

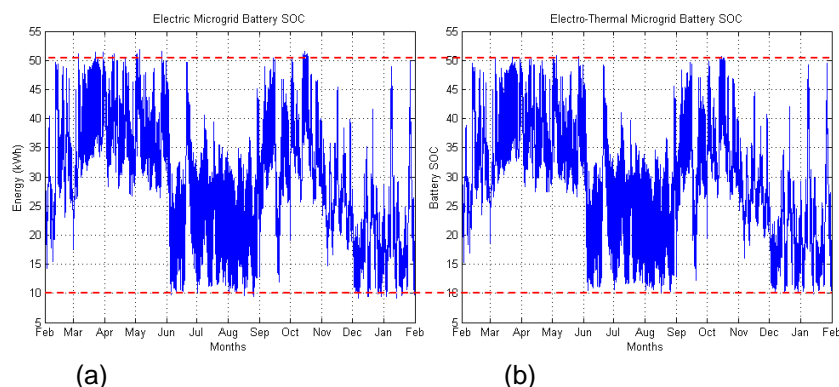


Figura 15 Estado de la batería de la microrred: (a) Eléctrica. (b) Electro-térmica.

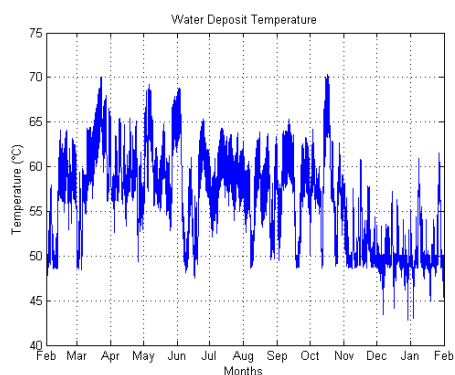


Figura 16 Evolución de la temperatura interna del depósito de agua

7. CONCLUSIONES

Se ha presentado el diseño de dos controladores Fuzzy Logic de 25 reglas cada uno para realizar la gestión energética de los sistemas de almacenamiento de una microrred electro-térmica doméstica.

El diseño se ha basado en la optimización de diferentes criterios de evaluación con el objetivo de mejorar la calidad del perfil de potencia intercambiado con la red eléctrica principal y se ha preservado la vida útil del sistema de almacenamiento eléctrico y térmico al evitar ciclos profundos de carga y descarga en la batería y al conservar la temperatura del depósito de agua en un rango específico.

Los resultados de simulación han demostrado el óptimo funcionamiento del controlador Fuzzy Logic propuesto y han evidenciado los beneficios que se obtienen al introducir elementos térmicos dentro de una microrred eléctrica.

8. REFERENCIAS

- [1] D. Lu and B. François, "Strategic Framework of an Energy Management of a Microgrid with a Photovoltaic-Based Active Generator," *Electromotion 2009-EPE Chapter "Electric Drives" Jt. Symp.*, pp. 1–6, 2009.
- [2] T. Vu Van, A. Woyte, J. Soens, J. Driesen, and R. Belmans, "Impacts of Distributed Generation on Distribution System Power Quality," in *Electrical Power Quality and Utilization Proceedings*, 2003, pp. 585–592.
- [3] Q. Jiang, M. Xue, and G. Geng, "Energy Management of Microgrid in Grid-Connected and Stand-Alone Modes," *Power Syst. IEEE Trans.*, vol. 28, no. 3, pp. 3380 – 3389, 2013.
- [4] K. Nunna and S. Ashok, "Optimal Management of Microgrids," in *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES)*, 2010, pp. 448–453.
- [5] L. Zhang, N. Gari, and L. V. Hmurcik, "Energy management in a microgrid with distributed energy resources," *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 297–305, Feb. 2014.
- [6] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, "Microgrids Management," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 54–65, 2008.
- [7] Y. Levron and D. Shmilovitz, "Optimal Power Management in Fueled Systems With Finite Storage Capacity," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 57, no. 8, pp. 2221–2231, 2010.
- [8] V. Agarwal, K. Uthaichana, R. A. DeCarlo, and L. H. Tsoukalas, "Development and Validation of a Battery Model Useful for Discharging and Charging Power Control and Lifetime Estimation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 3, pp. 821–835, 2010.
- [9] L. Xu, S. Member, Z. Miao, S. Member, and L. Fan, "Control of a Battery System to Improve Operation of a Microgrid," *2012 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, 2012.
- [10] Y. Riffonneau, S. Baccha, F. Barruel, and A. Delaille, "Energy flow management in grid connected PV systems with storage - A deterministic approach," *2009. ICIT 2009. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 1–6, 2009.
- [11] G. Byeon, T. Yoon, S. Oh, and G. Jang, "Energy Management Strategy of the DC Distribution System in Buildings Using the EV Service Model," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1544–1554, 2013.

- [12] Y.-K. Chen, Y.-C. Wu, C.-C. Song, and Y.-S. Chen, "Design and Implementation of Energy Management System With Fuzzy Control for DC Microgrid Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1563–1570, Apr. 2013.
- [13] H. Zhou, T. Bhattacharya, D. Tran, T. Sing, T. Siew, and A. M. Khambadkone, "Composite Energy Storage System Involving Battery and Ultracapacitor With Dynamic Energy Management in Microgrid Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 3, pp. 923–930, 2011.
- [14] J. Pascual, I. S. Martín, A. Ursúa, P. Sanchis, and L. Marroyo, "Implementation and Control of a Residential Microgrid Based on Renewable Energy Sources , Hybrid Storage Systems and Thermal Controllable Loads," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2013, pp. 2304–2309.
- [15] J. J. Barricarte, I. S. Martín, P. Sanchis, and L. Marroyo, "Energy Management Strategies For Grid Integration Of Microgrids Based On Renewable Energy Sources," *10th Int. Conf. Sustain. Energy Technol.*, pp. 4–7, 2011.
- [16] D. Arcos-Aviles, F. Guinjoan, J. Barricarte, L. Marroyo, P. Sanchis, and H. Valderrama, "Battery management fuzzy control for a grid- tied microgrid with renewable generation," in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2012, pp. 5607–5612.
- [17] F. H. Fahmy, D. M. Atia, N. M. A. El-, and H. T. Dorrah, "Optimal Sizing Of Solar Water Heating System Based On Genetic Algorithm For Aquaculture System," *2010 Int. Conf. Chemistry Chem. Eng. (ICCCE 2010)*, pp. 221–226, 2010.
- [18] D. Wang and Y. Liu, "Study on Heat Storage Tank of Solar Heating System," *2010 Int. Conf. Digit. Manuf. Autom.*, vol. 2, pp. 493–497, Dec. 2010.
- [19] K. Passino and S. Yurkovich, "Fuzzy Control," *Addisson-Wesley*, Dec. 1998.
- [20] D. Driankov, H. Hellendoorn, and M. Reinfrank, "An Introduction to Fuzzy Control," *Springer-Verlag*, 1996.
- [21] Y. Cengel and B. Michael, "Termodinamica," *McGraw Hill*, pp. 70–74, 2009.
- [22] P. I. S. S.L., "http://www.proinso.net/pub/doc/File/DIUNCL4_CT.pdf." .
- [23] S. A. Kalogirou, "Solar thermal collectors and applications," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 3, pp. 231–295, Jan. 2004.
- [24] T. Bergman, A. Lavine, F. Incropera, and D. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer*, Sixth. Jhon Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. 137–138.